УДК 550.47

К МОДЕЛИРОВАНИЮ ХИМИЧЕСКОГО И РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ПРИ ИСПЫТАНИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

К.О. Сабденов

Томский политехнический университет
E-mail: sabdenov@k21.phtd.tpu.ru

На основе разработанной ранее модели выпадения примеси из облака в устойчиво стратифицированной атмосфере проведен расчет уровня загрязнения поверхности земли химическими веществами при испытании ракетных двигателей на твердом топливе и радионуклидами при взрыве ядерных зарядов. Проведено качественное сравнение теоретических прогнозов с данными наблюдения. Предложены рекомендации по дальнейшему совершенствованию методики расчета переноса примесей в устойчиво стратифицированной атмосфере.

Атмосфера Земли представляет собой с термодинамической точки зрения чрезвычайно сложную систему. В масштабе планеты она сосредоточена в относительно малой области. Еще значительно меньшие пространства занимают в ней живые организмы. Но процессы, протекающие в атмосфере настолько сложны, что только лишь математическое описание тепловых и гидродинамических явлений в сильно упрощенном представлении ее слоем жидкости над поверхностью земли встречается с огромными трудностями. Их преодоление при нынешнем развитии вычислительной техники практически невозможно. Поэтому приходится прибегать к упрощенным модельным представлениям.

Наиболее распространенные здесь подходы опираются на диффузионные и гравитационные механизмы осаждения [1]. Несколько в стороне, ввиду относительно редкой возможности проявления, находится механизм вымывания, согласно которой частицы примеси могут захватываться естественными атмосферными осадками [2].

Как правило, в выброшенном в атмосферу облаке содержатся твердые или жидкие частицы вредных веществ, размеры которых меняются от нескольких единиц до нескольких десятков мкм. Важной величиной, по которой можно судить об уровне загрязнения поверхности земли, является количество $\sigma(x,y)$ выпавшего осадка на единицу площади поверхности земли.

В работе [3] предложена модель осаждения мелкодисперсной примеси на поверхность земли из облака, находящегося в устойчиво стратифицированной атмосфере. Такое состояние атмосферы в приповерхностном слое воздушной массы может реализоваться при отсутствии прямых солнечных лучей на поверхность земли, т.е. в относительно тихую пасмурную погоду, вечернее или темное время суток. При наличии ветра необходимо еще, чтобы поверхность земли была гладкой. Точнее размеры неровностей на ней должны быть много меньше толщины слоя стратификации.

Эволюция выброшенного облака загрязняющих веществ в устойчиво стратифицированной атмосфере подчиняется законам, отличным от тех, что предсказываются теорией турбулентного переноса. В частности облако, сплющиваясь под действием сил интрузии в подобную диску фигуру, практически сохраняет свой первоначальный объем. При этом течение газа в нем турбулентное, а за пределами облака турбулентность весьма низка [4, 5]. Упрощенные гидродинамические уравнения, описывающие течение жидкости внутри облака, имеют вид [3]

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}rvh=0,-\frac{\partial}{\partial r}ph=\tau_*,$$
$$p=\rho\frac{\omega_b^2}{12}h^2,\ 2\pi\int_0^\infty hr\,dr=\frac{1}{2}V=\text{const},\qquad(1)$$

где h – полутолщина облака; r – радиальная координата; t – время; v – единственная ненулевая компонента вектора $\mathbf{v}$ скорости газа в облаке; τ_* – турбулентное напряжение; ω_b – частота Брента-Вяйсаля, для атмосферы Земли $\omega_b\approx 0{,}01$ с$^{-1}$. Турбулентное напряжение дается выражением $\tau_*=\rho\kappa^2v^2$. Эмпирическая константа $\kappa\approx 0{,}4$. Последнее соотношение в системе (1) является условием сохранения объема V облака.

Как показано экспериментальными наблюдениями [4] и анализом уравнений (1), облако в устойчиво стратифицированной атмосфере быстро за время порядка $1/\omega_b$ выходит на продолжительный (до нескольких сут.) автомодельный режим эволюции, при котором [3]

$$h=h_0(t)\cdot 20^{-2/3}(\xi_*^3-\xi^3)^{1/3},$$

$$h_0(t)=\left(\frac{9}{4}\right)^{4/9}\left[\frac{\sqrt[3]{V}}{(2\pi)^{5/3}}\right]\left(\frac{t_*}{t+t_1}\right)^{4/9},\ \xi=r/r_0(t),$$

$$t_*=20\kappa/\omega_b,\ r_0(t)=\left(\frac{4}{9}\right)^{2/9}\sqrt[3]{2\pi V}\left(\frac{t+t_1}{t_*}\right)^{2/9},$$

где t_1 – условное время начала автомодельного режима. Числовой параметр ξ_*, определяющий размер (радиус) облака в плане, равен 2,63.

Идея, принятая за основу модели осаждения примеси из облака на поверхность земли проста: по мере движения облака из него по направлению к земле вылетают со скоростью $v_*\varepsilon$ частицы, падающие далее свободно в поле силы тяжести. Первый сомножитель v_* – это скорость свободного падения частиц в ламинарной среде, ее можно рассчитать по формулам Стокса [6], Рыбчинского-Адамара [7] и др. известным выражениям. Второй сомножитель ε имеет смысл интенсивности турбулентности и учитывает в простейшей форме хаотическое турбулентное движение частиц в облаке [3]. Значение ε для чисел Рейнольдса Re=10^6...10^7 составляет 0,03...0,05.

Изменение σ в точке (x,y) в момент времени t можно задать уравнением [3]

$$\frac{d\sigma}{dt}=\frac{M}{2V}v_*\varepsilon\cdot\theta[\xi_*r_0(t)-\sqrt{(x-v_xt)^2+(y-v_yt)^2}],\qquad(2)$$

где v_x, v_y – компоненты вектора скорости ветра на высоте зависания облака в декартовой системе координат, связанной с поверхностью земли; $\theta[z]$ – единичная функция Хевисайда, $\theta[z]=1$, если $z\geq 0$, $\theta[z]=0$, если $z<0$.

Функция Хевисайда определяет границу облака в проекции на поверхность земли.

Ур. (2) записано при допущении равномерного распределения частиц в облаке. Это положение грубое, но оно сильно упрощает модель, так как отпадает необходимость в рассмотрении динамики частиц в облаке. Для массы M справедливо уравнение

$$\frac{dM}{dt}=-\frac{M}{2V}v_*\varepsilon S(t),\qquad S(t)=\pi\xi_*^2r_0^2(t),$$

из него интегрированием при начальном условии $M(t=0)=M_0$ получим

$$M=M_0\exp\left\{-\lambda\left[\left(\frac{t+t_1}{t_*}\right)^{13/9}-\left(\frac{t_1}{t_*}\right)^{13/9}\right]\right\},$$

$$\lambda=\frac{v_*\varepsilon t_*}{\sqrt[3]{V}}(2\pi)^{5/3}\frac{9}{52}\left(\frac{4}{9}\right)^{4/9}\xi_*^2=17{,}9\frac{v_*t_*}{\sqrt[3]{V}}.\qquad(3)$$

Таким образом, для нахождения поверхностной плотности $\sigma(t,x,y)$ имеем одно обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка

$$\frac{d\sigma}{dt}=\frac{v_*\varepsilon M}{2V}\theta\left[\xi_*r_0(t)-\sqrt{(x-v_xt)^2+(y-v_yt)^2}\right]$$

с начальным условием $\sigma(t=0)=0$. Здесь M определяется согласно формуле (3).

Поставленная задача численно решалась методом Рунге-Кутта. Функция Хевисайда аппроксимировалась выражением $\theta[z]=[1+\exp(-\chi z)]^{-1}$, где $1/\chi$ – характерная длина, которую необходимо брать достаточно малой для четкого выделения границы облака. Согласно известной формуле Стокса [6], характерная скорость выпадения частиц в ламинарной среде $v_*=(2/9)\rho_p d_p^2 g/\mu$ (μ – динамическая вязкость газа облака).

В качестве примера на рис. 1 приведен результат расчета поверхностной концентрации σ, кг/м^2, химических загрязняющих веществ в виде Al_2O_3, HCl, H_2SO_4 и др. Численные значения физических параметров, отвечающих наземному испытанию первой ступени межконтинентальной баллистической ракеты [3], взяты в следующем виде: ρ_p=3000 кг/м^3, $d_p=3\cdot10^{-6}$ м, g=9,81 м/с^2, v_x=5 м/с, v_y=0 м/с, $\mu=1{,}8\cdot10^{-5}$ кг/(м·с), $V=16{,}0\cdot10^6$ м^3, κ=0,3, ε=0,03, $M_0=5\cdot10^4$ кг, $1/\chi$=10 м.

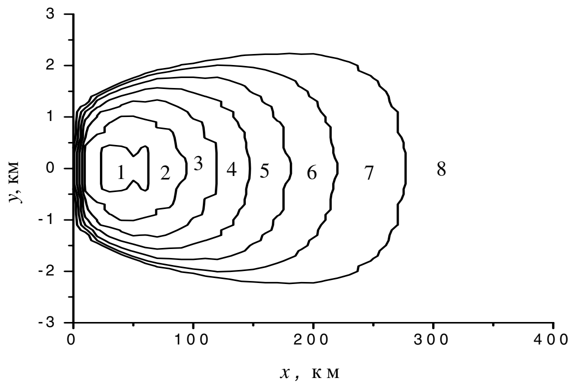


Рис. 1. *Изолинии уровня поверхностной плотности частиц $\sigma\cdot10^{-4}$ (x,y) кг/м^2. Номера соответствия областей, ограниченных изолиниями со значениями σ, следующее: 1) 0,87...1,0; 2) 0,74...0,87; 3) 0,61...0,74; 4) 0,48...0,61; 5) 0,35...0,48; 6) 0,22...0,35; 7) 0,09...0,22; 8) 0...0,09*

Расчеты также показывают, что наиболее сильно влияющими на $\sigma(x,y)$ размерными параметрами являются v_* и v_x, v_y (точнее, безразмерные комплексы v_*/v_x, v_*/v_y).

Сделаем несколько замечаний. В практическом приложении изложенной модели необходимо иметь в виду, что частицы, покинув облако, преодолевают еще расстояние от облака до поверхности земли. Поэтому, если за точку выброса считать начало координат, результаты расчетов σ по вышеприведенным уравнениям должны быть смещены на некоторое расстояние x_0 (в самом уравнении для σ этого можно достичь, заменив $x \to x+x_0$). Расстояние x_0 должно определяться с учетом неравномерности скорости ветра с высотой.

Апробация любой модели на экспериментальных данных по радиоактивному загрязнению поверхности земли в результате испытаний ядерного оружия или техногенных катастроф представляет собой достаточно сложную задачу. Сложность сравнения теоретических и экспериментальных результатов объясняется следующими существенными факторами:

– обилием в продуктах взрыва ядерного заряда радионуклидов, постоянные распада которых меняются в широком диапазоне;
– большим различием в количествах образующихся при взрыве радиоактивных элементов;
– расположением эпицентра ядерного взрыва относительно поверхности земли и вида этой поверхности (тип водного пространства, характер грунта и пр.);
– погодными условиями;
– разновидностью и мощностью ядерного заряда;
– временем проведения измерений уровня радиоактивного заражения и др.

По этим причинам при разработке моделей для расчета загрязнения окружающей среды радионуклидами на первом этапе целесообразно пользоваться параметрами, имеющими смысл усредненных величин по количеству возможных радиоактивных изотопов и интенсивности излучения по основным его видам: α-частицам, β- и γ-лучам. Зачастую такой подход оправдан тем, что результаты измерения отражают интегральные и усредненные характеристики уровня радиации.

Для ясного представления масштабности и сложности расчета заражения от радиоактивного облака, возникающего при взрыве ядерных зарядов, рассмотрим в качестве примера испытание «Castle Bravo», произведенного 1 марта 1954 г. на атолле Бикини. Кратер от взрыва получился 2 км в диаметре и глубиной 75 м [8]. Объем выброшенного грунта составил порядка 10^8 м^3 с общей массой около 150 млн т. За 3 с огненный шар вырос до 5,5 км в диаметре. В течение минуты грибовидное облако достигло высоты 15 км, поднявшись до 30 км двумя минутами позднее. За 6 мин облако взлетело до 40 км, через 8 мин после взрыва гриб достиг максимального размера в 20 км в диаметре, со стволом толщиной в 7 км, нижний его край начинался на высоте 16,5 км. «Castle Bravo» вызвал крупнейшее в США радиоактивное заражение прилегающих территорий и облучение местных жителей.

В представленном ниже рис. 2 (внизу) даны измеренные суммарные дозы облучения [8]. Здесь же приводятся результаты расчета (вверху) поверхностной концентрации загрязняющих веществ, выпавших на землю. Изолинии прочерчены по 1,33-кратному падению поверхностной концентрации σ от предыдущего значения. Области с концентрацией частиц ниже десятикратного падения от максимального значения в центральной части области загрязнения не приводятся. Здесь возможность сравнения расчетных данных с результатами измерения сильно ограничивается отсутствием метеорологических данных на момент испытания. Также заведомо неизвестно количество выброшенного в атмосферу радиоактивного вещества и характеристики его радиационного излучения, то сравнение проводится только по геометрическим размерам области выпадения радиоактивных веществ и темпу падения уровня радиации как функ-

ция от времени и расстояния от эпицентра взрыва. Этот шаг корректный, т.к. суммарная доза облучения напрямую зависит от количества имеющегося источника радиации.

Действительно, если λ_γ (с$^{-1}$) – интенсивность испускания γ-квантов со средней (по всем возможным источникам данного вида излучения) энергией E_γ, то количество энергии q_γ, испускаемое в единицу времени числом ядер N_γ загрязняющих веществ, равно [9]

$$q_\gamma = \lambda_\gamma E_\gamma N_\gamma .$$

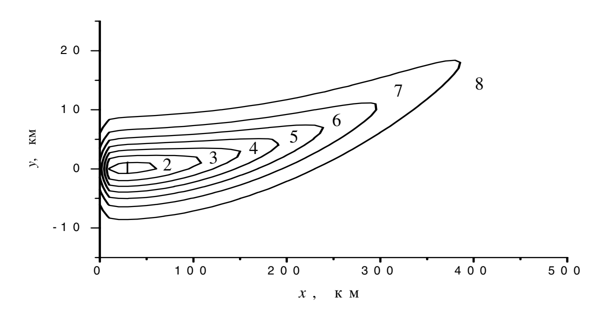
В формуле

$$N_\gamma = \frac{M_\gamma}{\mu_\gamma} N_A ,$$

выражающей число ядер γ-излучателей N_γ через их полную M_γ и молярную μ_γ массы, число Авогадро N_A, заменим M_γ на поверхностную плотность σ_γ примеси. Тогда q_γ будет иметь смысл поверхностной плотности энергии γ-квантов, излучаемой в единицу времени от выпавших на поверхность земли загрязняющих радиоактивных веществ:

$$q_\gamma = \lambda_\gamma E_\gamma N_A \frac{\sigma_\gamma}{\mu_\gamma} \ [\text{Дж/м}^2\cdot\text{с}]. \qquad (4)$$

При данном коэффициенте поглощения телом γ-квантов k_γ можно найти суммарную дозу облучения (Дж/кг = Гр) путем интегрирования по времени и его поверхности выражения $k_\gamma q_\gamma$, и поделив полученный результат на массу рассматриваемого тела [2, 10, 11].



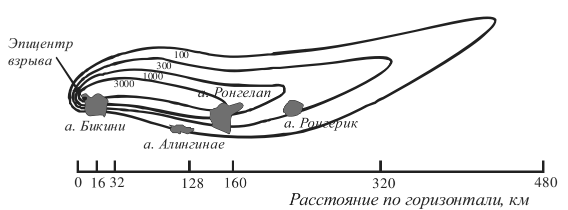


Рис. 2. *Изолинии (внизу) суммарной дозы облучения (рад) при непрерывной экспозиции продолжительностью до 96 ч после наземного испытания «Castle Bravo». Вверху – результаты расчета качественного поведения поверхностной концентрации загрязняющих частиц по модели настоящей работы. Номера соответствия областей, ограниченных изолиниями со значениями $\sigma\cdot10^{-5}$ кг/м^2, следующее: 1) 1,75...2,00; 2) 1,50...1,75; 3) 1,25...1,50; 4) 1,00...1,25; 5) 0,75...1,00; 6) 0,50...0,75; 7) 0,25...0,50; 8) 0...0,25*

Аналогичным образом можно получить выражения для поверхностных плотностей q_α, q_β энергии α- и β-излучения

$$q_\alpha = \lambda_\alpha E_\alpha N_A \frac{\sigma_\alpha}{\mu_\alpha},\ q_\beta = \lambda_\beta E_\beta N_A \frac{\sigma_\beta}{\mu_\beta} \qquad (5)$$

с константами и энергиями распада λ_α, λ_β, E_α, E_β, поверхностными плотностями осадков σ_α, σ_β, и молекулярными массами σ_α, σ_β и соответствующие дозы облучения.

При этом общее количество радиоактивных осадков σ связано с осадками по отдельным видам излучения простым соотношением

$$\frac{\sigma}{\langle\mu\rangle} = \frac{\sigma_\alpha}{\mu_\alpha} + \frac{\sigma_\beta}{\mu_\beta} + \frac{\sigma_\gamma}{\mu_\gamma},$$

где $\langle\mu\rangle$ – средняя молярная масса радиоактивных осадков.

Приведем грубую теоретическую оценку поглощенной человеком дозы радиации в энергетическом эквиваленте в районе радиоактивного загрязнения атолла Бикини. Опуская индексы, указывающие на тип излучения, примем по порядку величин эффективный период полураспада радионуклидов примерно равным одному году, т.е. λ=0,33·10^{-7} с$^{-1}$; среднюю энергию излучения E=0,01 МэВ=1,6·10^{-15} Дж; поверхностную плотность загрязняющих веществ σ=10 мг/м^2=10^{-5} кг/м^2; среднюю молярную массу μ=0,032 кг/моль. Тогда имеем q=10^{-2} Дж/(м^2·с). За 100 ч человек массой 60 кг с площадью поверхности тела ~1 м^2 и коэффициенте поглощения 0,5 получит дозу ~30 Дж/кг=3000 рад, что находится в хорошем согласии с данными наблюдения (рис. 2). Взятая здесь величина σ=10^{-5} кг/м^2 соответствует начальному M_0=100 т радиоактивного вещества в облаке.

В формулы (4, 5) не входят энергетические потоки от газообразных радиоактивных веществ. Для них расчет должен вестись по их массовой концентрации Y [кг/м^3] содержания в воздухе. Искомые энергетические потоки различных видов излучения получаются из вышеприведенных формул путем замен $\sigma_\alpha \to Y_\alpha$, $\sigma_\beta \to Y_\beta$, $\sigma_\gamma \to Y_\gamma$. При этом необходимо учитывать еще поглощающую способность самой атмосферы, которая оказывает довольно существенное ослабляющее действие на α- и β-излучения.

Все приведенные рассуждения касаются случаев, реализующихся при асимптотически больших временах, когда есть смысл разграничивать радиоактивные вещества на твердые (или жидкие) выпавшие осадки и газовые компоненты. На стадии выпадения для осадков, когда часть их остается еще во взвешенном состоянии в воздухе, расчет дозы облучения ведется одновременно как через массовую концентрацию Y мелкодисперсных частиц, так и их поверхностную концентрацию.

Скорость ветра, судя по эффективному распространению облака, менялась относительно незначительно во времени и более существенно по пространству. Грубый расчет дает оценку для модуля вектора скорости около 10 м/с. Поэтому принято v_x=10 м/с. Для поперечной компоненты v_y вектора скорости ветра использовались различные формы. Результаты на рис. 2 проведены с формой v_y=10^{-4}·x, где расстояние x измеряется в км.

Расчет с квадратичным представлением v_y=1,0–0,01x+2,5·10^{-5}·x^2 несколько лучше воспроизводит общую картину загрязнения радиоактивными веществами (рис. 3), особенно в районе атоллов Ронгелап, Алингинае и Ронгерик, но хуже на больших расстояниях от эпицентра.

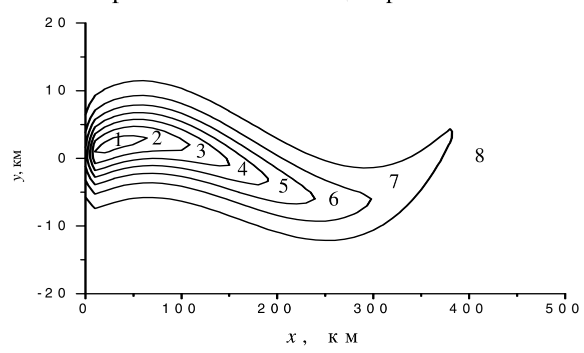


Рис. 3. *Испытание «Castle Bravo». Картина уровня загрязнения поверхности земли при ветре с квадратичным профилем скорости ветра от координаты x. Соответствие нумерации областей со значениями поверхностной плотности σ такое же, как и на рис. 2*

В проведенных расчетах моделирования распространения радиоактивных веществ при испытании «Castle Bravo» эффективная скорость осаждения частиц $v_*\varepsilon$=10^{-4} м/с.

Для более широкого применения модели с учетом явления турбулентной диффузии можно задавать закон изменения радиуса облака в плане с произвольным показателем степени: r_0~t^s, где параметр s подбирается на основе сравнения результатов теоретических расчетов с данными эксперимента. Необходимость в этом диктуется чрезмерно узким следом загрязнения, отношение характерной ширины следа к его характерной длине составляет около 0,1.

Выводы

Подводя итог к проделанной работе, можно заключить, что предложенная модель может применяться к оценке уровня загрязнения атмосферы химическими или радиоактивными веществами. Хотя и условия существования устойчиво стратифицированного состояния атмосферы довольно жесткие, тем не менее, как видно из результатов настоящей работы, зачастую такое приближение в реальности хорошо себя оправдывает. Дополнительным аргументом здесь может служить существование дождевых или снежных облаков, которое нельзя объяснить, не опираясь на представление об устойчиво стратифицированном состоянии атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 288 с.
2. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 192 с.
3. Сабденов К.О., Зубков С.В. О выпадении частиц из облака большого размера в устойчиво стратифицированной атмосфере // Прикладная механика и техническая физика. – 1996. – № 6. – С. 78–84.
4. Wu J. Mixed region collapse with internal wave generation in a density stratified medium // J. Fluid Mech. – 1969. – V. 35. – № 3. – P. 531–544.
5. Баренблатт Г.И. Динамика турбулентных пятен и интрузии в устойчиво стратифицированной жидкости // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1978. – Т. 14. – № 2. – С. 195–206.
6. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 840 с.
7. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1959. – 670 с.
8. Сайт Designed 2002 by Anton Volkov, http://nuclear-weapons.nm.ru: составлен по материалам: The High Energy Weapons Archive.
9. Голубев Б.П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений. – М.: Атомиздат, 1976. – 504 с.
10. Нормы радиационной безопасности (НРБ–99): Гигиенические нормативы СП 2.6.1. 758-99. – М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999. – 34 с.
11. Брегадзе Ю.И., Степанов Э.К., Ярына В.П. Прикладная метрология ионизирующих излучений. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 264 с.